

フラストレーションが生み出す特異なスピンの液体状態

近年、所謂“フラストレート系”の示す特異な物性に興味が集まっている。フラストレーションとは、色々な最適化の条件がお互いに競合し、系がそれらを同時に満たすことができないような、いわば「あちらを立てれば、こちらが立たず」という状況を指す。そこでは、しばしば大きく特異な揺らぎが発生し、新奇な秩序や熱力学相が実現する。特に、3角形構造をベースにした結晶配置を持つ反強磁性体では、幾何学的なフラストレーションの効果が重要になると考えられ、実験・理論両面から活発な研究が展開されている。

下図に示すハニカム格子と呼ばれる結晶格子は、3角形ではなく、6角形をベースにした格子である。ハニカムとは「蜂の巣」を意味し、本年度のノーベル物理学賞の対象となったグラフェンの結晶構造も、実はこのハニカムである。この結晶構造は、**up-down** の単純な反強磁性秩序と相性が良く、一見フラストレーションとは無縁な格子のように思われるが、何らかの要因で一旦フラストレーションが生じると、大変興味深い性質を示すことが分かってきた。例えば、近年の実験研究により、ハニカム磁性体 $\text{Bi}_3\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$ は、相互作用のエネルギー・スケールよりはるか下の低温まで通常の磁気秩序を示さず、むしろスピンの液体的に揺らぐような特異な挙動を示すことが報告されている（スピン液体と言われる）。このような特異な振る舞いの原因として、最近接相互作用 J_1 と次近接相互作用 J_2 の競合（図1）によるフラストレーション効果が重要ではないかと考えられている。

最近、大阪大学大学院理学研究科のメンバーを中心とする研究グループは、ハニカム格子上の2次元ハイゼンベルグモデルの秩序化を、数値シミュレーションと低温展開の手法により理論的に調べた結果、特に系が反強磁性境界近傍にある場合には低温まで磁気秩序化を示さず、“リング液体”や“パンケーキ液体”というべき新奇なスピン液体状態を取ることを明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan* (JPSJ)の2010年11月号掲載された。

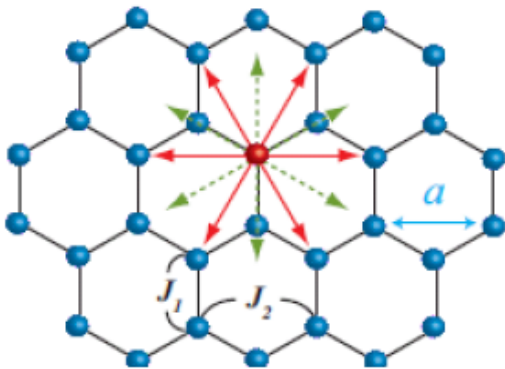


図1. ハニカム格子の結晶構造。 J_1 が最近接相互作用、 J_2 が次近接相互作用。

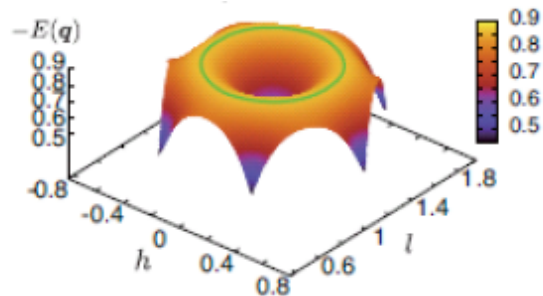


図2. 波数空間でのエネルギー（のマイナス）とリング状の状態の縮退。

最近接相互作用 J_1 、次近接相互作用 J_2 のハニカム格子上の反強磁性古典ハイゼンベルグ

モデルにおいては、過去の理論解析により、 J_2 が小さい時にはフラストレーションが効かず系は低温で up-down の通常の反強磁性秩序を示すのに対し、 J_2 が大きくなると反強磁性状態は不安定となり、波数空間で反強磁性状態をリング状に取り囲むような無限個の状態がちょうど同じ最低のエネルギーを持って縮退することが分かっていた (図 2)。もしこの無限縮退した状態間で系が揺らぎ続くことが出来れば、系は特定の状態を選ぶことが出来ずスピン液体的に振る舞うことも期待される。しかし実際には、たとえフラストレート系であっても、通常は揺らぎの効果により低温でこのような連続縮退は解け、系は特定の状態を選んで秩序化してしまう。「揺らぎによる秩序化」 (“order by disorder”) と呼ばれる機構である。

本研究は、ハニカム磁性体の反強磁性境界近傍においては、この揺らぎによる秩序化のエネルギー・スケールが劇的に抑制され、その結果、系は極低温まで秩序化せずにスピン液体状態にとどまり得ること、そして、そこで実現する状態は通常の高温度での無秩序状態とは大きく異なった波数空間における特異な構造を持つことを明らかにした。スピン構造因子と呼ばれる量に、図 3 に示すようなリング状やパンケーキ状のパターンが現れるのが特徴的で、それぞれリング液体、パンケーキ液体とも言うべき新奇なスピン液体状態になっている。また、パンケーキ状態の外から磁場をかけると、容易に通常の高磁性状態が誘起されることも分かった。このスピン構造因子は中性子散乱という実験手段で測定することが出来るが、これらの結果は現状の実験データと調和的である。実験とのより詳細な比較検討を含め、今後の研究の展開が期待される。

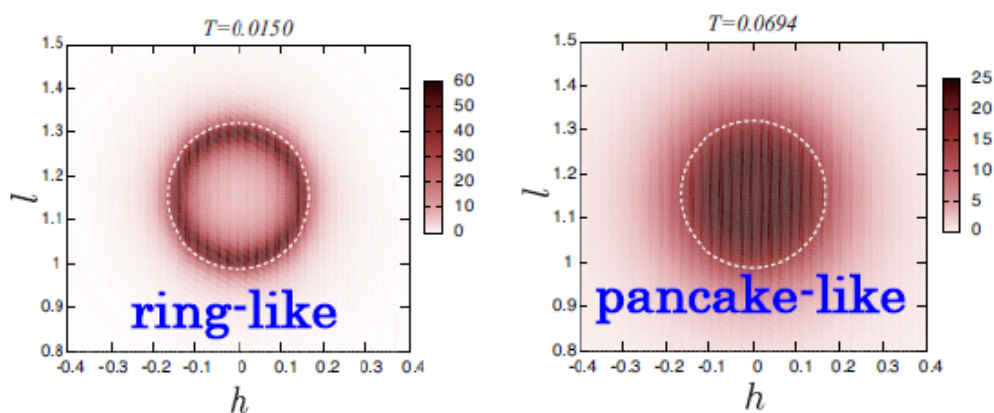


図 3. 2次元波数空間でのスピン構造因子の計算結果。それぞれ、リング的 (左) およびパンケーキ的 (右) なパターンが現れる。温度は、それぞれ $0.015J_1$ (左)、 $0.0694J_1$ (右) である、

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) No.11, p. 114705

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/79/114705> (10月25日公開済)

<情報提供：川村 光 (大阪大学大学院理学研究科)、
 大久保 毅 (大阪大学大学院理学研究科)、
 求 幸年 (東京大学大学院工学研究科) >